УДК 553.31

МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ АНОМАЛЬНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В.Г. Ворошилов

Томский политехнический университет
E-mail: lev@tpu.ru

Критически проанализированы возможности и особенности существующих методов выявления и геометризации структур аномальных геохимических полей рудных месторождений. Установлено, что структура геохимического поля наиболее объективно выявляется в пространстве признаков. Предложены новые способы и методика комплексирования существующих методов анализа структуры геохимических полей.

Исследование зональности геохимических полей, как важнейшей составляющей комплексной зональности месторождений, изначально было одним из приоритетных направлений в прикладной геохимии. Являясь отражением последовательного отложения минеральных парагенезисов, геохимическая зональность была и остается ведущим фактором прогнозирования оруденения любого типа и, в особенности, гидротермального.

После открытия в 70-х годах прошедшего века обобщенного ряда вертикальной геохимической зональности, закономерности последовательного отложения элементов стали использоваться во всех моделях зональности. Между тем, очень скоро выяснилось, что монотонное убывание с глубиной значений коэффициентов зональности часто сочетается с очень сложным их распределением в плоскости рудных тел, что делает проблематичным использование названных коэффициентов при достаточно редкой сети опробования. Особенно остро эта проблема встала для золоторудных месторождений, где обычным является столбовое и ярусное распределение оруденения. Впоследствии в понятие аномалии, кроме ореолов привноса элементов, все чаще стали включать и области их выноса. Выяснилось также, что эти сопряженные в пространстве положительные и отрицательные аномалии не являются чем-то изолированным, а представляют собой часть закономерно построенных конструкций со строгой иерархической соподчиненностью. Все это привело к появлению структурного метода исследования геохимических полей, при котором геохимические поля рассматриваются как структурированные системы, каждый блок которых характеризуется специфическими параметрами. В наиболее последовательном виде структурный метод изложен С.А. Григоровым [1]. Метод существенно облегчает разбраковку многочисленных аномалий,

выявляемых в процессе геохимических съемок, и позволяет выделить наиболее перспективные из них даже при идентичности количественных показателей. Главной проблемой при этом является правильная интерпретация внутреннего строения геохимического поля, учитывая пространственное совмещение аномальных структур различных иерархических уровней.

В настоящее время для расшифровки структуры геохимического поля используются, в основном, *две группы* методов: 1) выделение областей пространства со сходными геохимическими спектрами и 2) выявление устойчивых ассоциаций элементов и анализ их пространственного размещения. *Первая* группа методов основана на кластеризации наблюдений, *вторая* осуществляет классификацию в признаковом пространстве с последующей пространственной геометризацией выделенных ассоциаций. Наиболее широко используемые методы *первого* направления – метод многомерных полей, система "Геоскан" [2], *Q*-метод факторного анализа и его разновидности, кластер-анализ наблюдений, корреляция геохимических спектров наблюдений, методики вычисления показателей общей интенсивности рудного процесса (коэффициенты аномальности, комплексный показатель дисперсии, ранговая дисперсия и др.), различные мультипликативные и аддитивные показатели зональности. Ко *второй* группе относится R-метод факторного анализа, кластер-анализ переменных, искусственные нейронные сети, дискриминантный анализ, регрессионный анализ, другие методы классификации переменных.

Определенные сведения о структуре геохимического поля дают расчетные показатели, основанные на центробежно-центростремительной классификации химических элементов Ю.Г. Щербакова [3]. Этим автором предложено рассчитывать коэффициенты относительной концентрации (ОК) родственных элементов, нормированные по недифференцированным хондритам. Максимальные значения этих показателей характерны для апикальных частей рудных тел, а в более мелком масштабе, очевидно, – для флангов месторождений. В.И. Силаевым [4] предложены два показателя, основанных на классификации Ю.Г. Щербакова, которые мы предлагаем называть индексами центробежности (ИЦ1 и ИЦ2) и использовать их для анализа структуры геохимического поля. Первый из них (ИЦ1) представляет собой отношение суммы минимально-центробежных элементов к сумме центростремительных элементов, второй (ИЦ2) – отношение суммы центробежных и дефицитно-центробежных элементов к сумме центростремительных и минимально-центробежных. Содержания элементов должны быть стандартизованы.

Представляется полезным на конкретных примерах провести сравнительный анализ эффективности перечисленных методик исследования внутреннего строения геохимических полей различных иерархических уровней. Такой анализ проведен нами для разных типов золоторудных месторождений, а также золотосодержащих скарново-магнетитовых и колчеданно-полиметаллических объектов. Ниже обсуждаются результаты по одному из золоторудных полей.

Юхтинское рудное поле расположено в Центрально-Алданском золоторудном районе и включает в себя Самолазовское и Гарбузовское месторождения и около десятка мелких проявлений и точек минерализации золота. Оруденение представлено субгоризонтальными залежами сульфидно-флюорит-полевошпат-кварцевого состава и крутопадающими зонами прожилково-вкрапленной минерализации того же парагенезиса. Из сульфидов, количество которых обычно не превышает 5 %, развит, в основном, пирит, реже – галенит, халькопирит. Характерной особенностью оруденения рассматриваемого типа является его приуроченность к приконтактовой зоне штокообразных массивов сиенит-граносиенитов лебединского комплекса (рис. 1). При этом рудные залежи локализуются в скарнах, а прожилково-вкрапленная минерализация приурочена к зонам тектонических нарушений внутри интрузивных пород.

В основу наших построений положены результаты литогеохимической съемки масштаба 1:10000 по вторичным ореолам рассеяния в пределах Юхтинского массива и его обрамления (60 кв. км), выполненной ГУГПП "Алдангеология", и данные геохимического опробования керна скважин, пробуренных на месторождении Самолазовском артелью старателей "Селигдар".

Для всей площади работ во вторичном геохимическом поле факторным анализом выделяются следующие устойчивые ассоциации главных элементов-индикаторов: 1) Pb, Bi, Ag, Cu; 2) Ba, Mn; 3) As, (Ag, Au), 4) Au, Cu, Ag. Серебро и медь входят в состав двух ассоциаций – золото-медной и свинцово-висмутовой. Характерно, что содержания меди и золота тесно коррелируются на участках с промышленным оруденением, на остальной площади медь входит только в состав первого фактора.

На рис. 1, *В* показано пространственное размещение выделенных ассоциаций на изученной площади. Они объединяются в субмеридиональную дугообразную полосу размерами порядка 10×3 км. В пределах этой структуры, по масштабу соответствующей рудному полю, отчетливо выделяются 3 зоны – центральная, сложенная перекрывающимися ассоциациями Au, Cu, Ag и Pb, Bi, Ag, Cu, промежуточная, где преобладает ассоциация Pb, Bi, Cu, Ag, и внешняя, с повышенными концентрациями Ba и Mn. Промышленные месторождения обнаружены в центральной зоне, причем только там, где пространственно совмещаются две ассоциации (факторы 1 и 4), в промежуточной и внешней зонах известны только рудопроявления и точки минерализации.

Кластер-анализом наблюдений в рудном поле выявлено 4 устойчивых класса проб. Центральная

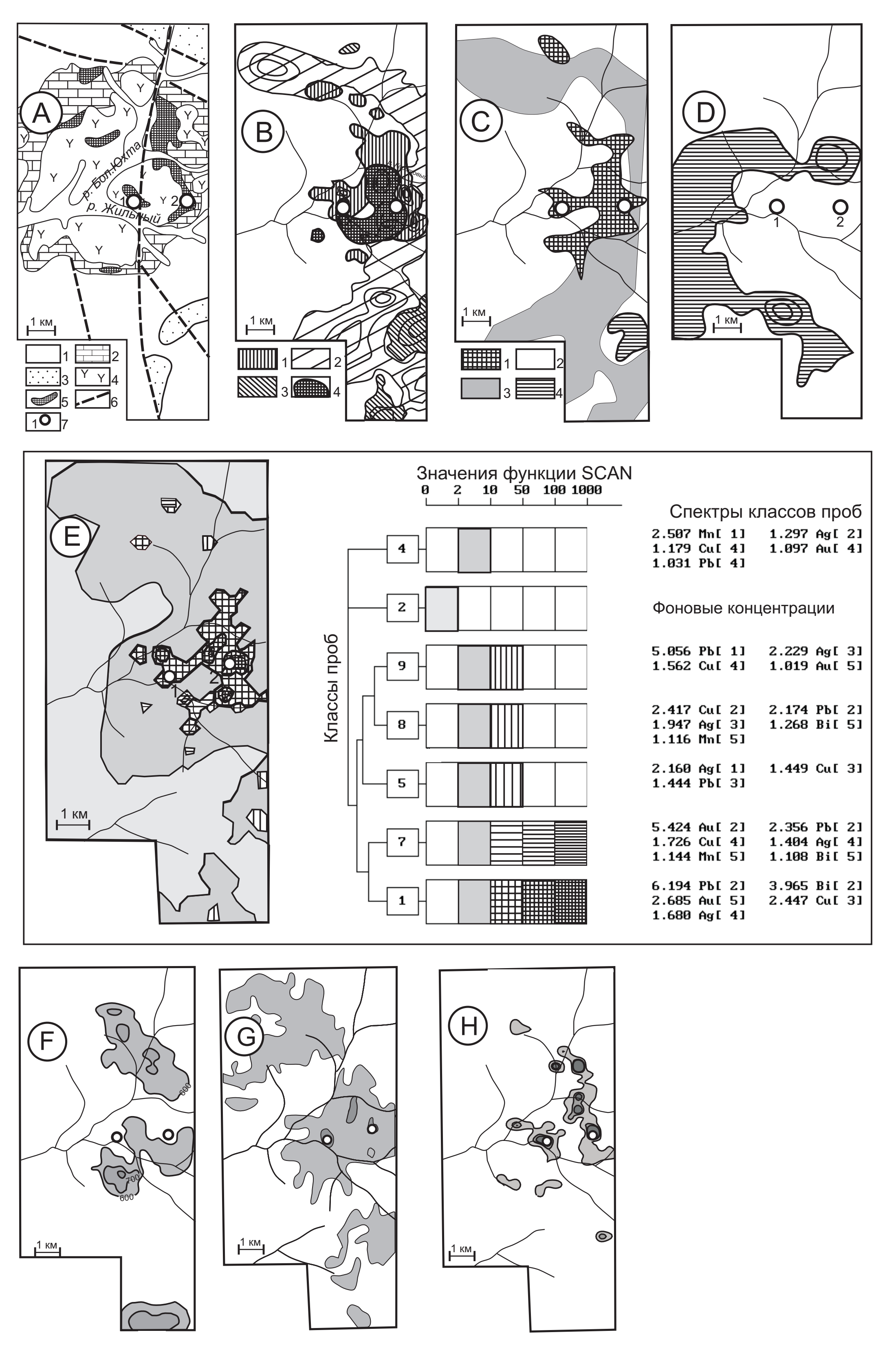


Рис. 1. *Модели геохимической зональности рудного поля по данным различных методов: A) схема геологического строения: 1) доломиты; 2) мрамора; 3) песчаники; 4) граносиениты; 5) скарны; 6) основные разрывы; 7) золоторудные месторождения: 1 — Самолазовское, 2 — Гарбузовское; B) факторный анализ; участки развития ассоциаций: 1) Pb, Bi, Ag, Cu; 2) Ba, Mn; 3) As, (Ag, Au), 4) Au, Cu, Ag; C) кластер-анализ наблюдений; состав кластеров: 1) Bi, Cu, Pb, Au, Ag; 2) фоновые концентрации всех элементов; 3) Ba, Mn; 4) As, Ag, Cu, Au, Pb; D) индекс центробежности ИЦ2; E) Геоскан-модель; F) показатель ОК Ag:Au; G) ранговая дисперсия (по [5]); H) энергия рудообразования*

часть площади, с наиболее интенсивной минерализацией, отнесена к кластеру № 1 (Au, Cu, Pb, Bi), к нему же отнесен слабо золотоносный участок на северо-западном фланге рудного поля (рис. 1, *C*). Кластер 4 (Ag, As) локализовал участок с предполагаемым оруденением куранахского типа. Кластером 3, как и в факторном анализе, оконтурилась площадь развития ассоциации Ba и Mn, остальные пробы отнесены к фоновой совокупности (кластер 2). Таким образом, кластер-анализ наблюдений не смог дифференцировать участки совмещения минерализаций различного типа в центральной части рудного поля. С учетом того, что интенсивность рудного процесса в результатах кластер-анализа наблюдений не отражается, очевидно, что результаты этого довольно трудоемкого метода во всех отношениях уступают данным, полученным факторным анализом.

Повышенные значения индекса центробежности ИЦ2=(As+Pb+Bi+Ba)/(Co+Ni+Cu+Ag+Au) формируют кольцевую полузамкнутую структуру, окаймляющую участок максимального оруденения с севера, запада и юго-запада, фиксируя зону фронтального обогащения рудного поля (рис. 1, *D*).

На рис. 1, E приведен результат исследования структуры геохимического поля Юхтинского массива системой "Геоскан". Центральная часть рудного поля отнесена к кластеру $Pb_{6,2}Bi_{4,0}Au_{2,7}Cu_{2,4}Ag_{1,7}$, причем максимум развития этой ассоциации совпадает с месторождением Гарбузовским. Самолазовское месторождение тоже находится внутри названного кластера, но интенсивность поля над ним достаточно низкая. Из сравнения с результатами факторного анализа видно, что на описываемой площади совмещены две геохимические ассоциации. В результате кластером, где золото является ведущим элементом (класс № 7) "Геоскан" фиксирует участки с непромышленной минерализацией на флангах известных месторождений. Тремя родственными классами проб медно-свинцово-серебряного состава с невысокой интенсивностью функции SCAN выделяются несколько локальных участков во фронтальной зоне рудного поля, на площадях с предполагаемым оруденением куранахского типа. Таким образом, "Геоскан" уверенно выделил рудоносные площади, дифференцировав их по интенсивности рудного процесса и типу геохимического спектра. В то же время, система не смогла идентифицировать участки перекрытия двух ассоциаций, медно-золотой и полиметаллической, а именно эти участки и вмещают промышленное оруденение.

Аномалии коэффициента относительной концентрации ОК Ag:Au окаймляют месторождения Самолазовское и Гарбузовское с севера и с юга и, по всей видимости, маркируют рудоподводящие субмеридиональные структуры (рис. 1, *F*).

Максимальными значениями "показателей интенсивности" (ранговая дисперсия и энергия рудообразования [5, 6]) уверенно выделяются оба промышленных месторождения (рис. 1, *G*; 1, *H*). Кроме того, на северном продолжении тектонической зоны, контролирующей размещение Гарбузовского месторождения, локализуются еще 2 участка с аномально высокими значениями этих показателей. Промышленных концентраций золота здесь не выявлено.

В ранге месторождения по геохимическим данным выделяется, как наиболее перспективный, участок, ограниченный ручьями Жильный, Карстовый и рекой Большая Юхта (участок Жильный).

Рис. 2, *A* демонстрирует структуру вторичного геохимического поля участка Жильного по данным факторного анализа. Здесь обособились 4 главных фактора, вклад которых в общую дисперсию составляет около 60 %. Они формируют очень контрастную полузамкнутую концентрическую структуру, от центра к периферии которой последовательно сменяются ассоциации: (Mo, Ag) – (Au, As) – (Pb, Bi, Ag, Zn, Cu) – (Ni, Cr, Co). С юга и севера структура окаймляется аномалиями Ba и Mn. Конфигурация аномальной структуры позволяет предполагать приуроченность ее к пересечению субмеридиональных, субширотных и северо-восточных разрывов, из которых первые можно рассматривать как рудоподводящие. На участке локализуются 4 аномальных структуры геохимического поля (АСГП), две из которых соответствуют месторождениям Самолазовскому и Гарбузовскому, две других фиксируют участки минерализации, связанные с северным продолжением субмеридиональных рудоконтролирующих зон. Последние две структуры имеют неполный набор ассоциаций, что свидетельствует о недостаточной интенсивности рудного процесса. Промышленных концентраций золота, по данным буровых работ, здесь не выявлено.

Системой "Геоскан" на участке Жильном выделено 7 аномальных кластеров с близкими геохимическими спектрами (рис. 2, *B*). Они концентрируются в нескольких локальных аномалиях, три из которых пространственно приурочены к Самолазовскому и Гарбузовскому месторождениям, но фиксируют здесь участки развития полиметаллических ассоциаций (Pb, Bi, Zn, Cu). Золото в них существенной роли не играет. Таким образом, оба промышленных месторождения системой "Геоскан" выявляются, но структуру геохимического поля расшифровать по полученным данным без дополнительной информации очень сложно.

Кластер-анализом в пределах Жильного участка выделено 5 классов проб (рис. 2, *C*). Золоторудные месторождения уверенно фиксируются кластером № 2 с повышенными концентрациями Pb, Bi, Ag, Zn, Cu, Tl, Sn, W, V. Зоны непромышленной минерализации, включая участки на северном продолжении рудовмещающих зон, отнесены к кластеру № 5, представленному теми же элементами, но с более низкими их концентрациями. В центре площади развита ассоциация Mo, Ag (кластер № 4), а по периферии месторождений проявлен кластер № 3 (Co, Ni, Ti, Mn, Li, Cr). Таким образом, структура геохимического поля, выявленная

кластер-анализом наблюдений, близка к АГСП, полученной по результатам факторного анализа, за исключением интенсивности геохимических преобразований, которая в результатах кластер-анализа напрямую не отражается.

Максимальные значения показателя энергии рудообразования характерны для Гарбузовского и Самолазовского месторождений, а также для двух участков на их северном продолжении. Последние, исходя из результатов кластер-анализа и факторно-

A
I
II
500 м
1 2 3 4 5 6

B
р.Бол.Юхта
р.Жильный
I
II
500 м

Значения функции SCAN
0 10 50 100 500 1000
Классы проб

Спектры классов проб

Класс			
10	40.339 PB[1]	27.607 BI[2]	14.202 LI[3]
	11.847 Au[4]	7.000 ZN[6]	6.995 MO[7]
	6.078 CU[7]	5.977 P [7]	5.616 MN[8]
8	41.317 PB[1]	17.272 Au[2]	16.756 LI[3]
	12.805 ZN[4]	11.834 BI[5]	11.110 MN[6]
	5.234 P [7]		
4	37.266 PB[1]	33.213 BI[2]	7.463 ZN[3]
	6.277 CU[4]	5.328 MN[5]	4.479 LI[7]
	4.070 P [7]	3.843 MO[7]	
7	54.782 PB[1]	26.799 BI[3]	14.589 ZN[3]
	11.373 LI[5]	8.219 MN[4]	4.672 P [6]
6	8.411 LI[2]	7.829 BI[2]	6.733 PB[3]
	6.308 P [4]	4.942 ZN[5]	4.938 MN[5]
	3.681 MO[7]		
5	43.379 MO[1]	11.912 BI[2]	8.316 PB[3]
	5.445 LI[4]	3.661 P [5]	
9	17.392 BI[2]	15.798 PB[2]	8.541 LI[4]
	7.301 MO[6]	5.909 ZN[5]	5.466 MN[6]
	5.257 P [6]	3.691 Au[11]	3.284 CU[9]
2	36.308 LI[1]	20.378 MN[2]	11.919 BI[3]
	6.725 ZN[4]	5.087 PB[5]	5.000 P [6]

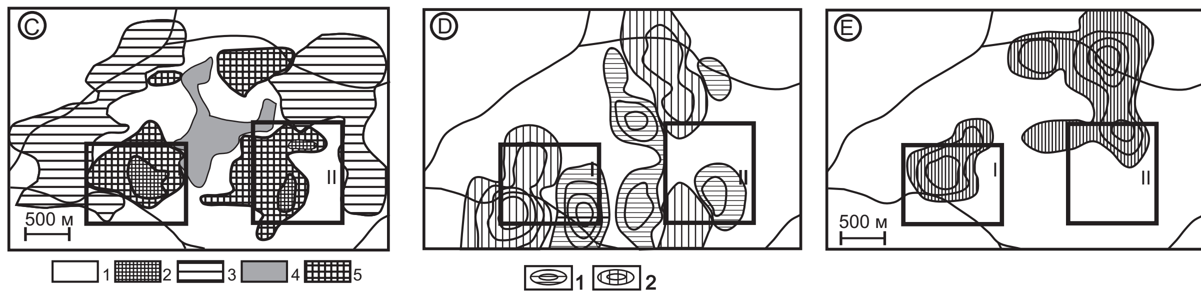


Рис. 2. *Структуры геохимического поля участка Жильного. А)факторный анализ; участки развития ассоциаций: 1) Pb, Bi, Ag, Zn, Cu; 2) Ni, Cr, Co; 3) Ba, Mn; 4) Mo, Ag; 5) Au, As; 6) контуры месторождений: I — Самолазовского, II — Гарбузовского; B) Геоскан-модель; C) кластер-анализ наблюдений; состав кластеров: 1) фоновые концентрации всех элементов; 2) $Pb_{5,62}$ $Bi_{4,83}$ $Ag_{3,39}$ $Zn_{3,12}$ $Tl_{1,96}$ $Cu_{1,93}$ $Au_{1,31}$; 3) $Co_{1,27}$ $Ni_{1,05}$ $Ti_{0,98}$ $Mn_{0,97}$ $Cr_{0,84}$; 4) $Mo_{3,72}$ $Ag_{0,76}$; 5) $Cu_{0,67}$ $Au_{0,67}$ $Bi_{0,67}$ $Ti_{0,60}$ $Ag_{0,54}$ $Zn_{0,51}$ $Pb_{0,43}$; D) индексы центробежности: 1) ИЦ1; 2) ИЦ2; E) показатель ОК Ag:Au*

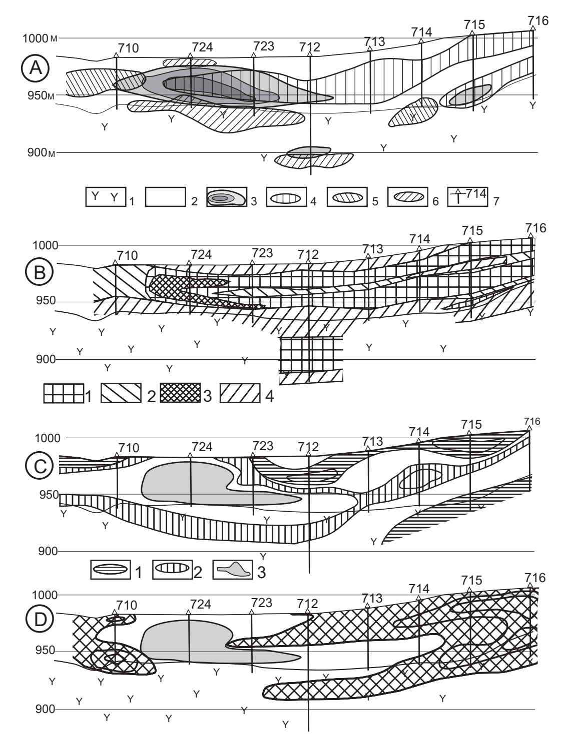
го анализа, могут быть отнесены к зонам рассеянной минерализации.

Повышенные значения индексов центробежности в пределах участка Жильного приурочены к рудоконтролирующим субмеридиональным структурам, причем аномалии показателя ИЦ1 отчетливо окаймляют с двух сторон зону повышенных значений показателя ИЦ2 (рис. 2, *D*). На месторождении Самолазовском это проявлено менее контрастно, чем на Гарбузовском, из-за пологого залегания рудного тела и значительной заболоченности участка.

Высокие значения коэффициентов относительной концентрации пары элементов Ag:Au приурочены к тем же рудоконтролирующим структурам и характерны для флангов месторождений (рис. 2, *E*). Наиболее золотоносные участки характеризуются пониженными значениями ОК и ИЦ. По этому признаку северное продолжение Гарбузовского месторождения может быть классифицировано как зона рассеянной минерализации, что подтверждает выводы, полученные кластер-анализом и факторным анализом.

Зональность размещения геохимических ассоциаций в плоскости рудных залежей рассмотрена на примере разведочных пересечений через Самолазовское месторождение (рис. 3). По результатам факторного анализа в пределах пологозалегающей залежи выявлено 4 класса элементов. Наиболее золотоносная часть залежи характеризуется аномальным накоплением Au, Ag, As, Tl, Pb, Cu, Mo, Ni, V, Sb, W. При этом As, Ni, Tl, Sb тесно коррелируются с золотом и объединяются с ним в одну ассоциацию. Участки ее распространения в целом совпадают с контурами промышленных блоков. Ассоциация Pb, Bi, Ag, Zn, Cu распространена более широко, но преимущественно в восточной части месторождения. В западном направлении она сменяется на ассоциацию Ba, Mn, Cr, которая сопровождается умеренной и слабой золотоносностью. Характерно, что наиболее золотоносные участки сопровождаются локальными аномалиями титана в лежачем и висячем боках рудных тел. Ti коррелируется с Mo и, в целом, эта ассоциация распространена на участке в виде полосы северо-восточного простирания. Возможно, она фиксирует рудоконтролирующую структуру ранга месторождения.

Системой "Геоскан" в разрезе через рудную залежь выявлено 7 аномальных классов проб со сходными геохимическими спектрами, в каждом из которых главную роль играет Pb. Близость состава геохимических спектров, обусловленная пространственным совмещением различных геохимических ассоциаций, не способствует пониманию механизма формирования геохимической зональности. Промышленная часть залежи выделяется, по-существу, лишь повышенным вкладом Au в геохимический спектр (рис. 3, *B*). Структуру же геохимического поля, без априорной информации, полученной другими методами, расшифровать доста-



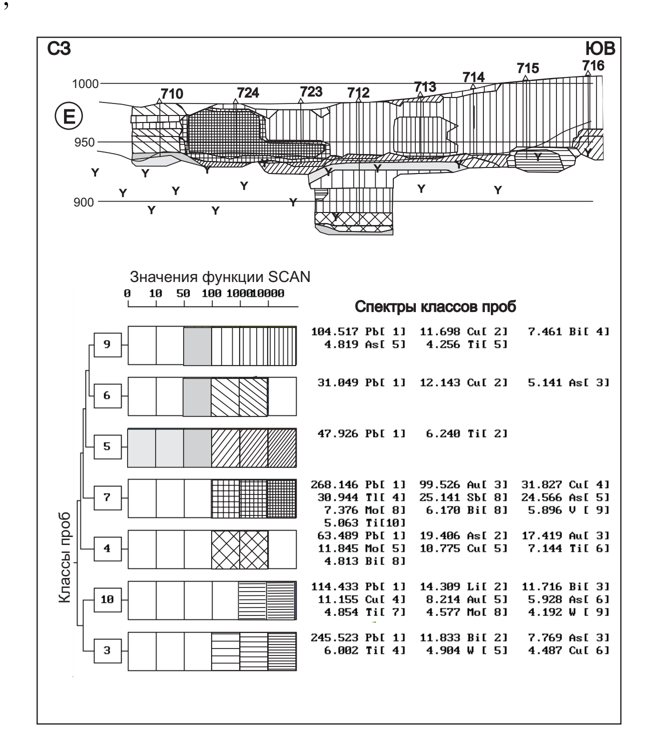


Рис. 3. *Структура геохимического поля ранга рудного тела. Разрез через месторождение Самолазовское: A) факторный анализ: 1) граносиениты; 2) дезинтегрированные скарны с рудной минерализацией; участки развития геохимических ассоциаций: 3) Au, As, Ni, Tl, Sb; 4) Pb, Bi, Ag, Zn, Cu; 5) Ba, Mn, Cr; 6) Ti, Mo; 7) разведочные скважины; B) кластер-анализ наблюдений; состав кластеров: 1)* $Bi_{0,71}Zn_{0,65}Pb_{0,48}Cr_{0,48}Co_{0,47}$ *2)* $Li_{0,38}Be_{0,28}Mn_{0,27}Ba_{0,23}$; *3)* $V_{3,58}Ni_{3,51}Tl_{3,51}Ag_{3,41}Sb_{3,19}Au_{3,16}As_{3,04}Pb_{2,46}Cu_{2,44}Mo_{2,05}$; *4)* $Ti_{1,05}Ba_{0,16}$; *C) области повышенных значений индексов центробежности: 1) ИЦ1=(P+Ti+V)/ (Mn+Cu+Ag+Zn+Ni+Co+Au; 2) ИЦ2=(Pb+As+Sb+Ba+Bi+Mo)/(P+Ti+V+Mn+Cr+Cu+Zn+Ag+Ni+Co+Au); 3) рудное тело; D) участки повышенных значений показателя ОК Ag:Au; E) Геоскан-модель*

точно сложно. Следует заметить, что в этих условиях обычный кластер-анализ наблюдений по нормированным данным дает более наглядную картину зональности (рис. 3, *C*).

Весьма показательно распределение в плоскости разреза значений индексов центробежности (рис. 3, *D*). Концентрический характер распределения значений ИЦ1 и ИЦ2 вокруг рудного тела дополняет картину зонального строения АСГП, выявленную вышеописанными методами, и позволяет говорить о принципиальной возможности создания типовой геохимической модели подобных объектов.

Распределение значений ОК Ag:Au в плоскости разреза свидетельствует о приуроченности их максимумов к слабозолотоносной периферии рудной залежи (рис. 3, *E*). Таким образом, данный коэффициент может быть использован как для прослеживания рудовмещающих структур, так и для расшифровки структуры геохимического поля.

Повышенные значения показателя энергии рудообразования однозначно коррелируютя с содержаниями золота. Никакой новой информации этот коэффициент не дает, поэтому его использование в масштабах первичных ореолов отдельных рудных тел, видимо, излишне.

Итак, характерными геохимическими ассоциациями самолазовского типа оруденения являются 1) Au, As, Ni, Tl, Sb; 2) Pb, Bi, Ag, Cu, Zn; 3) Ba, Mn. Состав их несколько видоизменяется на различных иерархических уровнях вследствие частичного перекрытия, но в целом выдерживается достаточно хорошо. Характерно, что АСГП различных уровней, от рудного поля до рудных тел, являются фигурами подобия, особенностью их внутреннего строения является приуроченность Au и ассоциирующих с ним элементов к центрам аномальных геохимических структур.

Внутреннее строение АСГП на всех иерархических уровнях наиболее полно и объективно выявляется с использованием методов кластеризации переменных, лучшим из которых является факторный анализ. Дополнительная информацию дают кластер-анализ наблюдений, система "Геоскан", показатели интенсивности рудного процесса, причем роль этих вспомогательных методов снижается с увеличением детальности исследований (от рудного поля к рудному телу). Напротив, показатели, основанные на центробежно-центростремительных свойствах элементов (ОК, ИЦ1, ИЦ2), наиболее интересные результаты дают в масштабе рудных тел. Сходные данные получены и для других типов изученных месторождений. Комплексирование перечисленных методов, с учетом обоснованной выше приоритетности, позволяет создавать обобщенные геохимические модели рудных объектов. Подобные морфологические модели могут быть описаны количественно и типизированы применительно к различным группам рудных месторождений и различным уровням их эрозионного среза. Создание таких типовых моделей – насущная проблема сегодняшнего дня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григоров С.А., Куклин А.А., Куклин А.П., Розенблюм И.С. Основные черты геохимической зональности золоторудных месторождений Северо-Востока СССР // Тихоокеанская геология. – 1988. – № 3. – С. 97–103.
2. Гинзбург Л.Н., Евсеев В.А., Лурье М.Б., Токавищев И.А., Карась С.А. Геоскан – программное обеспечение прогнозно-поисковых работ // Разведка и охрана недр. – 2002. – № 5. – С. 11–17.
3. Щербаков Ю.Г. Геохимические индикаторы золоторудных полей // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36. – № 9. – С. 42–52.
4. Силаев В.И., Цой В.Д., Федчишина Э.Б. Отражение геологического строения рудоносных территорий в неоднородности аномальных геохимических полей // Геология и геофизика. – 1990. – № 11. – С. 39–49.
5. Боярко Г.Ю. Построение карт ранговой дисперсии геохимического поля // Прикладная геохимия. – Вып. 3. – М.: ИМГРЭ. – 2002. – С. 107–115.
6. Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П. Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. – Л.: Недра, 1978. – 265 с.